

鋼中セメントタイトの変形および破壊挙動に関する研究

著者	井上 明久
号	492
発行年	1974
URL	http://hdl.handle.net/10097/9228

氏 名	井 上 明 久
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 5 0 年 3 月 2 5 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項
研究科，専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 金属材料工学専攻
学 位 論 文 題 目	鋼中セメンタイトの変形および破壊挙動に関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 増本 健
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 増本 健 東北大学教授 辛島 誠一 東北大学教授 須藤 一 東北大学教授 木村 宏 東北大学教授 西沢 泰二

論 文 内 容 要 旨

セメンタイトは鋼における最も一般的な炭化物の一つであり，鋼の機械的性質や加工性に大きな影響をおよぼすと考えられる。しかし，従来は主にフェライトにのみ注目した研究が多く，セメンタイトの役割についての研究はほとんど無かった。この観点から，本研究では，鋼の塑性変形に対するセメンタイトの役割を解明するために，冷間圧延あるいは引張り変形した炭素鋼および合金鋼（合金元素として Cr，Mn，Ni，Co）中におけるセメンタイトの内部欠陥組織，硬さおよび応力挙動などを光学顕微鏡，透過電子顕微鏡および走査電子顕微鏡などによって観察し，セメンタイト結晶の変形，破壊挙動およびそれらの温度依存性等の詳細を明らかにしたものであり，論文は全編 10 章よりなっている。次にその概要を各章ごとに述べる。

第 1 章の緒論では，鋼中セメンタイトの変形，破壊に関する従来の研究がほとんど無く，一部の

断片的な報告しか無いことを示し、本研究の意義と目的について述べている。

第2章では試料および実験方法について述べており、大きなセメンタイト結晶などの試料の作製法、炭素鋼の高温引張り試験およびセメンタイト結晶の高温硬さ測定などの材料試験法、セメンタイト中の内部欠陥組織の観察法などを述べている。

第3章ではセメンタイト結晶の硬さの温度依存性および標準組織を持つ種々の炭素鋼（0.02% C～1.20% C）の機械的性質の温度依存性を調べ、高温における鋼の機械的性質とセメンタイトの塑性変形の容易さを実験的に比較検討している。

第4章では、白鉄中に存在する大きなセメンタイト結晶にピッカース圧子を押し付け、その圧痕近傍に発生した γ 線を光学顕微鏡で観察して、セメンタイト結晶の γ 面を解析した結果を述べている。すなわち、ピッカース圧子を押し込んだセメンタイト結晶表面には面方位および温度の適当な条件の下では明瞭な γ 線が観察され、その γ 挙動に顕著な温度および方位依存性があることを明らかにし、またセメンタイトのように異方性の大きな結晶でも活動 γ 面とシュミット因子との間には密接な関係があることを示している。

第5章では、セメンタイト結晶の変形挙動をより微視的な観点から明らかにするために、冷間圧延あるいは引張り変形した炭素鋼中のセメンタイトの内部欠陥組織を透過電子顕微鏡で観察し、鋼中セメンタイトにおける γ 面、 γ 方向、 γ 面上の転位配列などの塑性変形組織の詳細、格子欠陥の種類およびそれらの温度変化などを調べ、次の事実を明らかにしている。

冷間圧延した鋼中のセメンタイトは明らかに γ によって塑性変形する。しかし、その γ 変形は0.3～0.5 μ 間隔を持つ γ 面上で集中して行なわれ、極めて不均一である。セメンタイトの主な γ 面は $(100)_\theta$ 、 $(010)_\theta$ 、 $(001)_\theta$ であり、これら各 γ 面上のバーガース・ベクトルはそれぞれ $b[010]_\theta$ 、 $c[001]_\theta$ および $b[010]_\theta$ である。また、これらの γ 面上に観察される転位は大部分らせん転位である。

低温（-196℃、-78℃）で引張り変形した鋼中のセメンタイト内には変形によって導入された転位はほとんど見られないが、室温で変形したセメンタイト内には多くの集積転位が見られ、明らかな γ 変形が認められる。300℃でのセメンタイト中の転位密度は室温の場合に比べてかなり増加し、セメンタイトが一層塑性変形しやすくなる。さらに500℃では室温で活動する γ 面に加えて、 $\{110\}_\theta$ 系の γ 面も活動し、同一のセメンタイト内で二種以上の γ 系が活動するようになる。同時に刃状成分を持った転位、転位双極子、転位ループおよびカスプなども見られるようになる。700℃で変形したセメンタイト内の転位密度と変形量および変形温度との関係を明らかにしている。とくに、500℃以上において、セメンタイトの動的回復現象が顕著になり、500℃変形の場合に転位密度が変形初期において飽和すること、および転位密度の温度による変化が500℃で極大をとることを示している。

第6章ではCr, Mn, Ni およびCoを含むセメンタイトの内部欠陥組織を透過電子顕微鏡で観察し、鋼中セメンタイトの変形挙動およびその温度依存性におよぼす合金元素の影響を調べ、各元素の特徴的な効果を明らかにしている。

低Cr鋼中のセメンタイトの変形組織は炭素鋼中セメンタイトとほぼ同じであるが、Crを10%以上固溶したセメンタイトの塑性変形は非常に困難になる。その変形組織は500℃においても集積転位が主であり、転位ループや転位双極子などは見られない。

Mnがセメンタイト中に固溶すると、積層欠陥の観察される頻度が増すと共に、 $(001)_\theta$ 上の完全転位が積層欠陥を含んだ半転位に分解する頻度も増す。500℃における積層欠陥面は $(001)_\theta$ のみでなくなるが、その他の変形組織の特徴は炭素鋼のそれとほとんど同じである。

Niがセメンタイトに固溶すると変形および回復は純粋セメンタイトに比べて容易になる。すなわち、Niを固溶したセメンタイトの変形の際のり面の種類は純粋セメンタイトに比べて多く、また500℃の変形で、すでに回復を示す明瞭な亜粒界がしばしば観察される。

一定の圧延率におけるセメンタイト中の転位密度はNi鋼, Mn鋼, Cr鋼の順に低く、この順序でセメンタイトの変形が容易になっていると考えられる。この結果はセメンタイトの硬さの順序と一致しており、また光学顕微鏡および透過電子顕微鏡による欠陥組織の観察結果とも一致している。

第7章はセメンタイト結晶の破壊挙動を走査電子顕微鏡および透過電子顕微鏡で観察した結果について述べたものである。

室温以下で変形した鋼中セメンタイトは主として劈開によって破壊し、その劈開面は大部分が $\{110\}_\theta$ であり、他に $\{100\}_\theta$, $\{210\}_\theta$ も観察される。室温および300℃においては大部分のセメンタイトは $(010)_\theta$, $(100)_\theta$ のり面に沿ったり変形によっていくつかのブロックに分割され、その後各ブロックの境界であるり面に集中して変形して、ついにその境界に沿って破壊する。一方、500℃および700℃で引張り変形した鋼中セメンタイトにおいては、り面が集中した $(010)_\theta$, $(100)_\theta$ のブロック境界に沿って空洞が形成され、それらの空洞の連結によって破壊したり、またネッキングによって破壊する。その他、セメンタイトの幾何学的形状と破壊面との関連性についても述べている。

第8章では冷間圧延した炭素鋼中のセメンタイトの回復過程を透過電子顕微鏡観察, X線回折および磁気測定によって調べた結果について述べている。

約400℃の焼なましでは、フェライト地からの拘束による弾性ひずみおよびフェライト—セメンタイト界面に存在するひずみが消滅し、次いで500℃～600℃になるとモアレ縞の消滅や、転位の再配列と消滅によって回復が進行して、セメンタイト内転位密度が著しく減少すると共に、明瞭な転位網あるいは小傾角粒界が形成される。また、セメンタイトの凝集による顕著な球状化現象が認められる。

第9章は本研究で明らかにしたセメントイトの変形および破壊に関する知見を基にして、鋼の変形および破壊の挙動を検討したもので、セメントイトの体積率の大きい高炭素鋼の変形抵抗能とセメントイトの塑性変形能とが関連していることを述べている。

第10章は総括である。

審 査 結 果 の 要 旨

セメンタイトは鋼における最も一般的な炭化物の一つであり、鋼の機械的性質や加工性に大きな影響をおよぼしている。本研究は、従来ほとんど明らかでない鋼の塑性変形に対するセメンタイトの役割を解明するために、鋼中のセメンタイトの変形および破壊の挙動を詳細に調べたものであり、全編10章よりなる。

第1章は緒言であり、本研究の意義と目的について述べている。

第2章では試料の作製法、材料試験法、組織観察法などについて記述している。

第3章では鋼の高温における機械的性質とセメンタイトの塑性変形の容易さとが密接な関係にあることを実験的に示している。

第4章ではセメンタイト結晶のり面を解析し、り挙動に顕著な温度および方位依存性が認められることを明らかにした結果について述べ、セメンタイトのように異方性の大きな結晶でも活動り面とシュミット因子との間には関係があることを示している。

第5章は変形した炭素鋼中のセメンタイトの内部欠陥組織を透過電子顕微鏡により観察した結果の記述である。セメンタイトにおけるり面、り方向、り面上の転位配列などの塑性変形組織の詳細、格子欠陥の種類およびそれらの温度変化などを明らかにしている。

第6章では鋼中のセメンタイトの変形挙動およびその温度依存性におよぼすCr, Mn, NiおよびCoの影響を調べ、各元素の特徴的な効果を明らかにしている。

第7章ではセメンタイトにおける劈開割れ挙動の詳細、内部欠陥と破壊との関連性およびその温度依存性などについて述べている。

第8章では冷間圧延した炭素鋼中のセメンタイトの内部欠陥の回復過程を調べた結果を述べている。

第9章では本研究で明らかにしたセメンタイトの変形および破壊に関する知見を基にして、高炭素鋼の変形抵抗能とセメンタイトの塑性変形能との関連について言及している。

第10章は総括である。

以上述べたように、第4章から第8章までが本論文の中軸をなすものであって、フェライトと共存するセメンタイトが塑性変形した場合の内部欠陥組織、転位の性質、り系、劈開面などを詳細に調べて、セメンタイトの変形特性および破壊過程を明らかにし、鋼の変形能の理解に大きな貢献をしたものであり、金属工学の発展に寄与するところ少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。